

Д. Р. Ситкина^{1,2}, А. Б. Кузнецов¹, З. Б. Смирнова¹

ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД АГАРИНГОЛЬСКОЙ СВИТЫ (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ): ВОЗМОЖНОСТИ РЬ-РЬ ДАТИРОВАНИЯ¹

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

² Санкт-Петербургский Горный университет,
Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., 2

В работе рассмотрены основы РЬ-РЬ метода датирования и возможности его применения на примере известняков агарингольской свиты. Изучение U-Pb системы проводилось в образцах углеродистых известняков, удовлетворяющих геохимическим критериям сохранности (Mg/Ca, Mn/Sr, Fe/Sr и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) карбонатных пород и прошедших процедуру ступенчатого растворения. Вычисленный возраст известняков агарингольской свиты в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ равен 621 ± 93 млн лет, СКВО = 1,3. Полученный возраст согласуется с вендским (эдиакарским) возрастным интервалом, установленным на основе метода Sr изотопной хемотратиграфии ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70740$ – $0,70748$). Новые данные позволяют уточнить время седиментации карбонатных осадков, начинающих венд-кембрийский этап формирования Тувино-Монгольского массива. Библиогр. 35 назв. Ил. 7. Табл. 2.

Ключевые слова: РЬ-РЬ возраст, известняки, венд, агарингольская свита, Тувино-Монгольский массив.

D. R. Sitkina^{1,2}, A. B. Kuznetsov¹, Z. B. Smirnova¹

AGE OF CARBONATE ROCKS OF THE AGARIN-GOL FORMATION (NORTHERN MONGOLIA): POSSIBILITIES OF Pb-Pb DATING

¹ Institute of Precambrian geology and geochronology RAS, 2, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² St. Petersburg Mining University, 2, 21-ya liniya V. O., St. Petersburg, 199106, Russian Federation

The article discusses in detail the possibility of using the Pb-Pb method to date Neoproterozoic carbonates. The Pb-Pb method has been used to date the limestone of the Agarin-gol Formation. The U-Pb system was studied in carbonate samples which conformed to the geochemical criteria of retention (Mg/Ca, Mn/Sr, Fe/Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and have undergone a step-dissolution procedure. In $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ coordinates, the age of the Agarin-gol limestone is to 621 ± 93 Ma, MSWD=1.3. This age is consistent with the Ediacaran age established on the basis of the Sr isotope chemostratigraphy ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70740$ – 0.70748). New data allows for the specification of the sedimentation age of carbonate sediments, which is Vendian-Cambrian stage of the Tuva-Mongolian Massif. Refs 35. Figs 7. Tables 2.

Keywords: Pb-Pb age, limestones, Ediacaran, agarin-gol formation, Tuva-Mongolian massif.

Введение

Возраст осадочных пород имеет важное значение при расшифровке истории формирования осадочных бассейнов, проведения региональной корреляции и реконструкции геодинамической обстановки. В большинстве случаев определение возраста осадочных пород проводится с помощью палеонтологических исследований, а также косвенными методами — датированием прослоев вулканитов, прорывающих магматических тел и детритовых цирконов [1]. В последние годы стано-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-01090).

вится популярным Re-Os изотопный метод, однако с его помощью можно определять возраст только тех осадочных пород, которые содержат большое количество органического вещества [2]. В том случае если мы имеем дело с существенно карбонатной толщей, определение возраста возможно U-Pb и/или Pb-Pb методом [3–12].

Карбонатные породы способны сохранять изотопно-геохимические характеристики с момента осадконакопления, что открывает возможность получения геохронологической информации. Морские карбонатные осадки характеризуются относительно высокой концентрацией урана (от 0,1 до 3 мкг/г) и очень низкой концентраций свинца (около 0,001 мкг/г), что делает их потенциально пригодными для получения стратиграфически значимого U-Pb и Pb-Pb возраста [3, 11]. При этом в первом случае вычисление возраста возможно в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$, а во втором — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ [13]. В случае осадочных карбонатных пород, использование Pb-Pb метода получает преимущество над U-Pb, так как недавнее перераспределение свинца и урана не способно изменить изотопный состав свинца, а следовательно, и повлиять на качество Pb-Pb изохроны. Вычисляемый Pb-Pb возраст отвечает времени раннего диагенеза, близкого к возрасту седиментации, в том случае, если породы не подвергались существенным эпигенетическим изменениям [4, 6]. Для отбора образцов, минимально подвергшихся вторичной перекристаллизации, применяется методический подход, включающий в себя: 1) петрографический анализ, 2) геохимическое изучение, 3) определение изотопного состава стронция в карбонатах и 4) процедуру ступенчатого растворения для удаления вторичных карбонатных фаз [5, 6, 11, 14, 15].

Карбонатные породы представляют собой достаточно сложные объекты для проведения Pb-Pb датирования, так как существует весьма небольшое количество докембрийских карбонатных формаций, не затронутых какими-либо постседиментационными изменениями. В этой статье нами представлены возможности геохронологического изучения докембрийских известняков агарингольской свиты Северной Монголии. Эту свиту впервые выделили и детально описали А. С. Гибшер и Я. Бат-Ирээдуй (1990) в верховьях р. Мурэн при слиянии с р. Агарин-Гол. Карбонатные отложения свиты имеют мощность около 1000 м и представлены преимущественно массивными углеродистыми известняками. В тектоническом отношении карбонатные породы агарингольской свиты слагают венд-кембрийский осадочный чехол Тувино-Монгольского массива. Карбонатные отложения агарингольской свиты накапливались в спокойной обстановке открытого мелководного шельфа при минимальном привносе терригенного материала, поэтому обломочные цирконы (распространенные минералы-геохронометры) пока не обнаружены в этих породах. В отложениях свиты также пока не найдены достоверные находки руководящей фауны. Таким образом, единственным решением проблемы возраста агарингольских отложений является изотопно-геохимическое и геохронологическое изучение карбонатных пород.

Геологический обзор

Территория Монголии охватывает срединный отрезок Центрально-Азиатского складчатого пояса, размещающегося между Сибирской и Северо-Китайской платформами. Этот пояс представляет собой сложное покровно-складчатое сооружение,

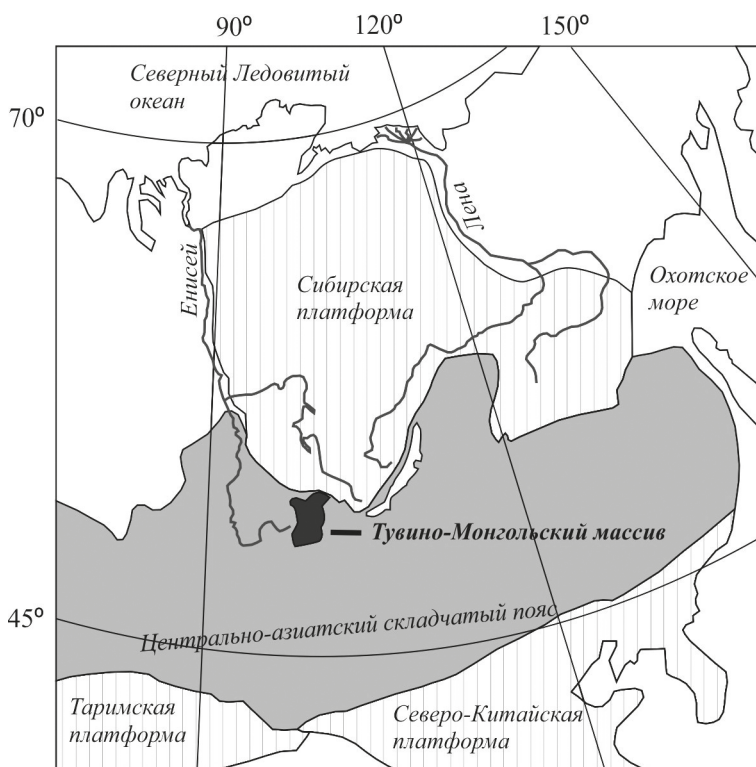


Рис. 1. Положение Тувино-Монгольского массива в структуре Центрально-Азиатского складчатого пояса

объединяющее несколько каледонских и герцинских складчатых зон, которые в свою очередь обрамляют докембрийские блоки с кристаллическим фундаментом [16–19].

Среди самых крупных докембрийских блоков Северной Монголии в современной структуре выделяется Тувино-Монгольский массив (рис. 1). Геологическая история массива разделена тектоническими событиями на три этапа — раннебайкальский (1000–800 млн лет), позднебайкальский (800–600 млн лет) и раннекаледонский (600–490 млн лет) [17, 18]. Первые два этапа включали в себя образование фундамента Тувино-Монгольского массива в результате коллизии позднеархейских кристаллических пород Гарганского блока, вулканитов сархойской серии и пород офиолитовых комплексов и островных дуг на рубеже 800 млн лет и 600 млн лет [17, 18]. Раннекаледонский этап характеризуется накоплением венд-кембрийского карбонатного чехла в условиях пассивной континентальной окраины [18, 20]. Присутствие венд-кембрийских отложений платформенного типа является главным критерием, который лежит в основе выделения Тувино-Монгольского массива как самостоятельного структурного элемента [21–24]. Отложения венда-кембрия в регионе детально изучены, так как содержат месторождения фосфоритов и бокситов, однако вопрос о возрасте этих толщ до сих пор не решен. Верхние горизонты венд-кембрийского чехла содержат остатки раннепалеозойской фауны, тогда как нижние лишены достоверных окаменелостей и их положение в разрезе осадочного чехла остается неясным [18, 20]. Таким образом, уточнение времени начала форми-

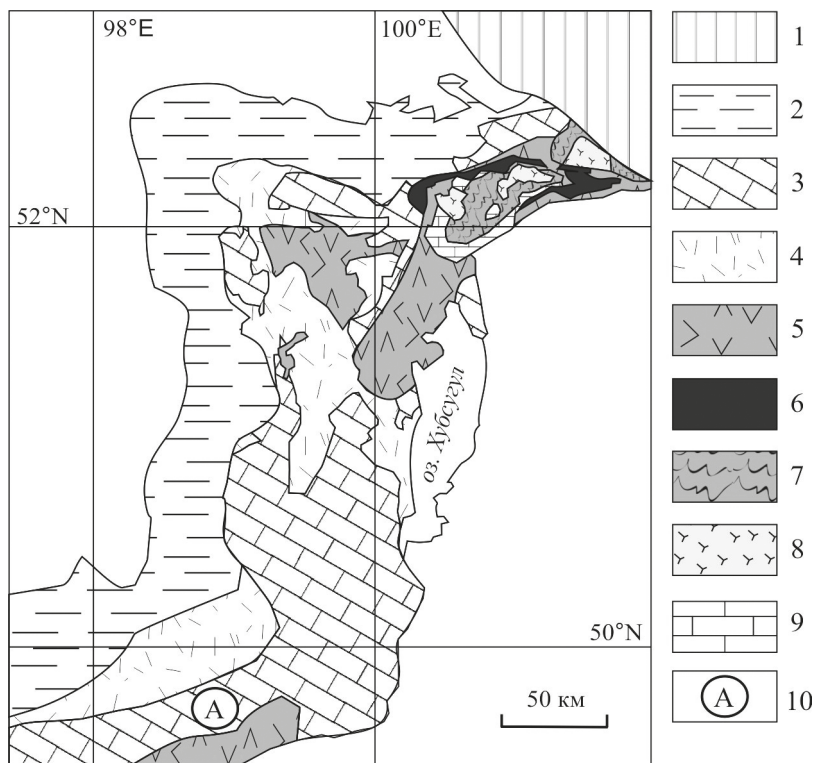


Рис. 2. Геологическое строение Тувино-Монгольского массива (по [18]) и положение изученного разреза. 1 — Сибирская платформа; 2 — терригенные породы окинской серии и хайсуинской свиты; 3 — венд-кембрийский карбонатный чехол; 4 — верхнерифейская вулканогенная сархойская серия; 5, 6 — рифейские офиолиты и вулканогенные породы дунжутурского комплекса; 7 — верхнеархейские гранито-гнейсы Гарганской глыбы; 8 — тоналиты сумсунурского комплекса; 9 — рифейские карбонаты иркутской свиты; 10 — положение изученного разреза агарингольской свиты.

рования карбонатных отложений в пределах Тувино-Монгольского массива до сих пор остается одной из актуальных проблем.

Докембрийские карбонатные отложения чехла в юго-западной краевой части Тувино-Монгольского массива картируются в Мурэнской структурно-фациальной зоне Западного Прихубсугулья (рис. 2) в составе агарингольской (мурэнской) свиты [25]. Стратотипический разрез агарингольской свиты имеет мощность около 1000 м и расчленяется на восемь пачек (рис. 3). Разрез свиты начинается пачка I (110 м) черных тонкоплитчатых ритмично-слоистых мелкокристаллических углеродистых известняков, согласно залегающая на терригенных породах хайсуинской свиты. Плитчатые известняки перекрываются маломощной пачкой II (25 м) мелкозернистых слюдястых песчаников, алевролитов и черных аргиллитов, которые выше по разрезу сменяются мощной карбонатной пачкой III (415 м). Последняя включает в себя чередование черных тонкоплитчатых и темно-серых среднеплитчатых кристаллических известняков с примесью терригенного материала. Выше залегает пачка IV (60 м) черных и серых аргиллитов с линзами черных кристалли-

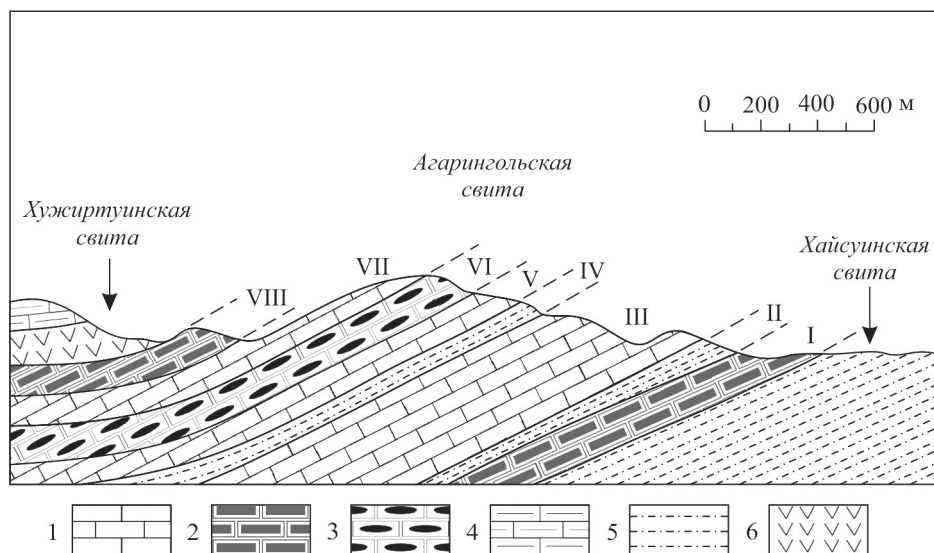


Рис 3. Геологический профиль по левому берегу р. Мурэн-Гол выше устья р. Хайсуин-Гол (по [25]): 1–4 — известняки: 1 — массивные, 2 — углеродистые, 3 — с линзами кремней, 4 — обломочные; 5 — песчаники, алевролиты, аргиллиты; 6 — вулканогенные породы. То же для рис. 4.

ческих известняков, которая перекрывается пачкой V (100 м) черных массивно-слоистых и плитчатых кристаллических известняков с линзами черных кремней. Они постепенно сменяются переслаиванием черных плитчатых кристаллических известняков пачки VI (130 м) с сантиметровыми прослоями кремней и темно-серыми массивно-слоистыми кристаллическими известняками пачки VII (105 м), практически лишенными прослоев и линз кремней. Разрез свиты завершает пачка VIII (130 м) черных углеродистых тонкоплитчатых кристаллических известняков, с прослоями глин и кремней в верхней части, которая согласно перекрывается вулканогенно-терригенными породами хужиртуинской свиты.

Стратиграфическим аналогом хайсуинской свиты в западной и северо-западной краевой части Тувино-Монгольского массива являются терригенные породы окинской и хугейнской серий, возраст которых соответствует первой половине рифея [26]. Аналогом хужиртуинской свиты являются кремнисто-карбонатно-вулканогенные отложения чахыртойской свиты Сангилена [25], возраст которой не древнее нижнего кембрия. Для перечисленных отложений агарингольской свиты отсутствуют обоснованные палеонтологические и геохронологические данные, что позволяет ограничить время седиментации названных отложений в широком возрастном интервале от рифея до нижнего кембрия.

Основы U-Pb/Pb-Pb метода определения возраста

Образование стабильных изотопов свинца при распаде урана является основой для важных методов определения возраста, в которых используются не только превращение урана в свинец, но также распад промежуточных дочерних продуктов и зависящая от времени эволюция обыкновенного свинца [13, 27].

В природе встречаются три изотопа урана — ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U с распространенностью 99,3, 0,7 и 0,005 % соответственно, и четыре изотопа свинца — ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb с распространенностью 1,5, 23,6, 22,6, 52,3 % [28]. Все изотопы урана радиоактивны. Распад ^{238}U начинается так называемый урановый ряд, который включает в себя ^{234}U в качестве промежуточного дочернего продукта и завершается стабильным ^{206}Pb . Распад ^{235}U образует актиниевый ряд, который завершается стабильным ^{207}Pb . ^{208}Pb является продуктом распада ^{232}Th , а ^{204}Pb нерадиоактивный и используется в качестве стабильного изотопа сравнения [13, 29].

Для того чтобы датировать породы (минералы) проводится анализ серии когенетических образцов. Вычисление возраста по результатам анализа возможно, если геохимическая история образцов отвечает следующим условиям [11]: 1) породы (минералы) образовались в одно и то же время t ; 2) при кристаллизации они захватили различное количество обыкновенного Pb единого изотопного состава; 3) на протяжении своего существования образцы сохранялись как замкнутые геохимические системы, т. е. помимо радиоактивного распада не происходило какого-либо привноса или выноса U и Pb.

В замкнутых системах распад U в Pb описывается уравнениями:

$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U}(e^{\lambda_8 t} - 1), \quad (1)$$

$$^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U}(e^{\lambda_5 t} - 1), \quad (2)$$

где λ_8 , λ_5 — константы скорости радиоактивного распада ^{238}U и ^{235}U соответственно; t — время, прошедшее после того, как минерал образовал замкнутую систему по отношению к U, Pb и всем промежуточным дочерним продуктам. Таким образом, изотопный состав свинца в минералах, содержащих уран, может быть выражен в виде уравнений:

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_i + \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}(e^{\lambda_8 t} - 1), \quad (3)$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_i + \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}(e^{\lambda_5 t} - 1), \quad (4)$$

где $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, — изотопные отношения свинца в минерале во время анализа; $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$, — первичное изотопное отношение Pb, включенного в минерал во время его образования; $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}$, — изотопные отношения во время анализа; λ_8 , λ_5 — константы распада ^{238}U , ^{235}U соответственно; t — время, прошедшее после того, как минерал образовал замкнутую систему по отношению к U, Pb и всем промежуточным дочерним продуктам [27, 29]. Используя изохронные графические методы определения возраста [13], в координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ эти уравнения представляют прямые линии (U-Pb изохроны) вида:

$$y = a + bx, \quad (5)$$

где a является точкой пересечения с осью y и соответствует первичному изотопному отношению Pb в породе (минерале), b — тангенс угла наклона прямой из которого может быть вычислен возраст t :

$$t = \frac{\ln(\operatorname{tg} \alpha + 1)}{\lambda}. \quad (6)$$

Определить возраст также возможно, используя отношения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, с помощью комбинации уравнений (3) и (4):

$$\frac{^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i}{^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i} = \frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}} \times \left[\frac{e^{\lambda_{2t}} - 1}{e^{\lambda_{1t}} - 1} \right], \quad (7)$$

где отношение $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ представляет собой константу, равную в настоящее время 1/137,88 для всех образцов урана с нормальным изотопным составом как Земли, так и Луны, и метеоритов. Исключение составляет урановое месторождение Окло в Африке, которое представляло собой природный атомный реактор, действовавший около 1,8 млрд лет назад [29]. Если проанализировать разновозрастные породы с одинаковыми начальными отношениями изотопов свинца, то они образуют прямую линию в координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Pb-Pb изохрону), тангенс угла наклона которой позволяет рассчитать возраст.

Для методов U-Pb и Pb-Pb датирования обычно используются породы или минералы, которые условно можно разделить на три группы с различным соотношением концентраций урана и захваченного первичного свинца [3]: 1) минералы с $\text{U}/\text{Pb} \approx 0$ (сульфиды, полевые шпаты), которые практически не накапливают ураногенного Pb и поэтому, как правило, сохраняют первичный изотопный состав Pb со времени их образования (кристаллизации); 2) минералы, характеризующиеся высоким (до 10^6) отношением U/Pb (такие как циркон, сфен, монацит); 3) породы и минералы, U/Pb отношения в которых лежат в интервале от 0 до 1000.

Рассмотренные в настоящей работе карбонатные породы агарингольской свиты относятся к третьей группе. Широкий диапазон значений отношения U/Pb делает их удобным материалом для датирования.

Так как важным условием для получения корректного значения возраста является сохранность изотопно-геохимической системы, для выявления образцов карбонатных пород с наименее затронутой вторичными изменениями U-Pb системой проводился строгий отбор, включающий в себя: петрографическое исследование, в ходе которого отбраковывались образцы карбонатных пород, подвергшиеся значительным вторичным преобразованиям (наличие вторичных прожилков, перекристаллизация); изотопно-геохимическую оценку сохранности пород на основе тех же геохимических критериев, которые применяются при выборе образцов для Sr-изотопной хеомстратиграфии (отношения $\text{Mg}/\text{Ca} \leq 0,024$, $\text{Mn}/\text{Sr} < 0,2$, $\text{Fe}/\text{Sr} < 5,0$); отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для селекции карбонатной генерации; ступенчатое растворение образцов для выявления фракций наиболее обогащенных первичным карбонатным материалом [6, 9, 14, 15, 30].

Изотопно-геохимическая характеристика карбонатных пород агарингольской свиты

Петрографическое исследование карбонатных пород из нескольких пачек агарингольской свиты (рис. 4) показало, что большинство образцов характеризуются массивной текстурой и сложены средне- и мелкокристаллическим кальцитом

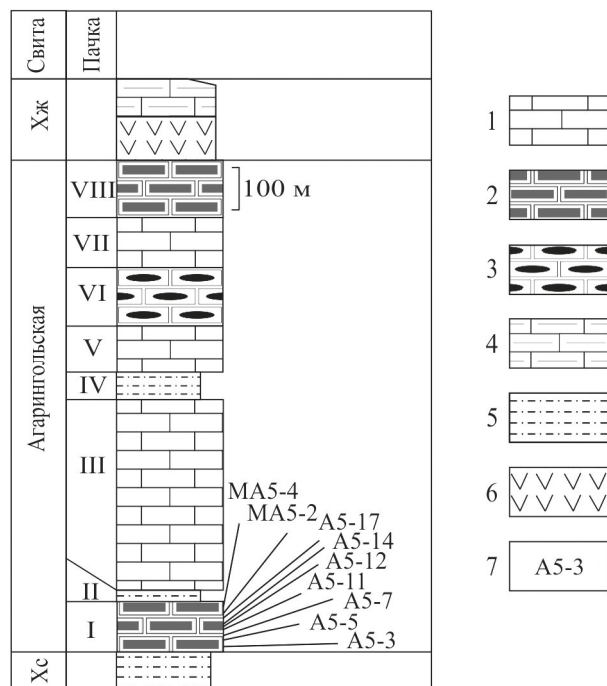


Рис. 4. Строеение агарингольской свиты в разрезе г. Торхалиг-Ула и места отбора образцов. 1–6 — условные обозначения как на рис. 3; 7 — образцы для изотопно-геохронологического исследования. Сокращения свит: Хс — хайсуинская, Хж — хужиртуинская.

с небольшой (до 1–4 %) примесью обломочного кварца и углеродистого вещества. Кремнистые прослои пачки VI представляют собой фтаниит, сложенный халцедоном, кварцем, единичными зернами кальцита и пирита. Образцы, отобранные из пачки III, содержат большое количество прожилков вторичного кварца и имеют микросланцеватую текстуру.

Для изотопно-геохронологического исследования было выбрано девять образцов из пачки ритмично-слоистых мелкокристаллических углеродистых известняков в основании агарингольской свиты. Большинство известняков характеризуется низкими содержаниями Mg ($\leq 0,3\%$) и Mn (50–130 мкг/г), повышенным содержанием Fe (1030–2250 мкг/г) и очень высокой концентрацией Sr (2160–2730 мкг/г). Образцы удовлетворяют геохимическим критериям сохранности, отношение Mn/Sr и Fe/Sr в них ниже 0,05 и 1,0, соответственно. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в изученных известняках лежит в узких пределах 0,70740–0,70748 (табл. 1), что также указывает на отсутствие эпигенетической перекристаллизации и делает их потенциально пригодными для изучения U–Pb систематики.

Химическая обработка образцов проводилась при комнатной температуре в растворе соляной кислоты разных концентраций. На предварительной стадии навеска растворялась в 0,03N HCl, что позволило удалить от 2 до 4 % поверхностных загрязнений и вторичных карбонатных генераций. Далее растворение про-

*Таблица 1. Изотопно-геохимические данные
для известняков агарингольской свиты, Северная Монголия*

Образец	Положение образца*	СП, %	Mg, %	Mn, мкг/г	Fe, мкг/г	Mn/Sr	Fe/Sr	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
MA5-4	300	4,9	0,1	60	1030	0,03	0,5	0,16	2180	0,0002	0,70743
MA5-2	10	4,8	0,1	130	1930	0,05	0,7	0,18	2730	0,0002	0,70742
A5-17	24	7,0	0,3	55	1810	0,02	0,8	0,26	2340	0,0003	0,70743
A5-14	20	6,2	0,2	80	1610	0,04	0,7	0,18	2160	0,0002	0,70748
A5-12	18	8,0	0,2	75	2250	0,03	1,0	0,09	2280	0,0001	0,70742
A5-11	15	16,6	0,1	60	1420	0,03	0,6	0,16	2380	0,0002	0,70747
A5-7	11	4,2	0,2	70	1520	0,03	0,6	0,27	2410	0,0003	0,70740
A5-5	9	4,4	0,3	66	1550	0,03	0,6	0,19	2530	0,0002	0,70741
A5-3	7	6,7	0,2	50	1250	0,02	0,6	0,14	2240	0,0002	0,70746

Примечание. * — положение образца указано в метрах от основания карбонатной пачки.
СП — доля силикокластической примеси.

должалось в 1N HCl до полного перехода в раствор карбонатной составляющей навески (фракция ECC). Доля нерастворимого в 1N HCl силикатного остатка составила от 4 до 17 %. Дополнительно для трех образцов (A5-5, A5-7, A5-14) было

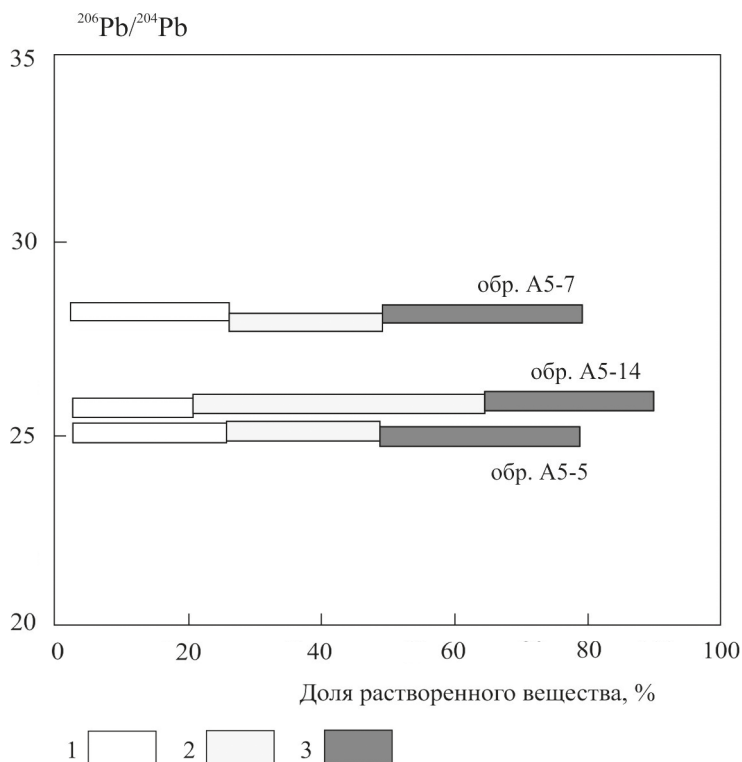


Рис. 5. Вариации отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в карбонатных фракциях известняков, агарингольской свиты в зависимости от доли растворенного вещества. 1 — фракция L1; 2 — фракция L2; 3 — фракция L3.

проведено ступенчатое растворение. Предварительно образцы также растворялись в 0,03N HCl, в ходе чего в раствор перешло от 1–2 % карбонатного вещества. Далее растворение образцов проводилось в 1N HCl в три стадии. В результате было получено по три фракции для каждого образца (рис. 5). В первой фракции (L1) содержание вещества составляло от 21 до 26 %, во второй фракции (L2) от 21 до 43 %, в третьей фракции (L3) от 26 до 40 %. Доля нерастворимого в 1N HCl силикатного остатка составила от 9 до 20 %. Раствор выделенных карбонатных фракций делился на две аликвоты, одна для определения изотопного состава Pb, другая для определения содержания U и Pb с добавлением смешанного индикатора $^{235}\text{U} + ^{208}\text{Pb}$. Для выделения U использовалась экстракционная смола UTEVA SPEC (Eichrom, США) в 2N HNO_3 , а для выделения Pb — ионообменная смола Bio-Rad 1x8 в 0,5N HBr. Изотопный состав Pb и содержание U и Pb измеряли на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI с Re-лентами ионного источника в режиме одновременной регистрации ионных токов всех изотопов. Параметры изохрон вычислялись с использованием программы ISOPLOT.

Содержания Pb (0,6–1,5 мкг/г) и U (0,2–0,9 мкг/г) (табл. 2) в карбонатной составляющей известняков небольшие и соответствуют средним значениям, обычно присутствующим в докембрийских карбонатных породах (обычно Pb \approx 1; U < 1 мкг/г). Отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в карбонатной составляющей образцов изменяется от 23,193 до 28,506. Величина измеренного отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в первой фракции ступенчатого растворения варьирует от 25,105 до 28,064, во второй фракции от 25,519 до 26,918, в третьей фракции от 24,702 до 27,421. Вычисленное значение воз-

Таблица 2. U-Pb аналитические данные для известняков агарингольской свиты

Номер образца	Фракция	Доля фракции, %	U, мкг/г	Pb, мкг/г	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
MA5-4	ECC	91,7	0,2	0,6	24,050	15,882
MA5-2	ECC	92,8	0,7	0,8	23,193	15,081
A5-17	ECC	90,4	—	—	23,349	15,828
A5-14	ECC	90,8	0,4	0,9	26,759	16,066
	L1	20,2	—	—	25,390	15,940
	L2	43,4	—	—	25,519	15,959
	L3	26,2	—	—	25,746	15,955
A5-12	ECC	89,5	0,7	1,3	24,514	15,905
A5-11	ECC	79,9	0,5	1,5	23,747	15,831
A5-7	ECC	92,5	0,8	0,9	28,506	16,105
	L1	25,4	—	—	28,064	16,044
	L2	21,7	—	—	26,918	15,957
	L3	32,1	—	—	27,421	15,003
A5-5	ECC	92,5	0,6	1,0	25,038	15,934
	L1	22,4	—	—	25,105	15,910
	L2	25,3	—	—	25,833	15,977
	L3	29,9	—	—	24,702	15,892
A5-3	ECC	89,7	0,3	0,6	24,495	15,892

Примечание. ECC — карбонатная составляющая образцов; L1–L3 — карбонатные фракции, полученные ступенчатым растворением в 1N HCl; прочерк — нет определений.

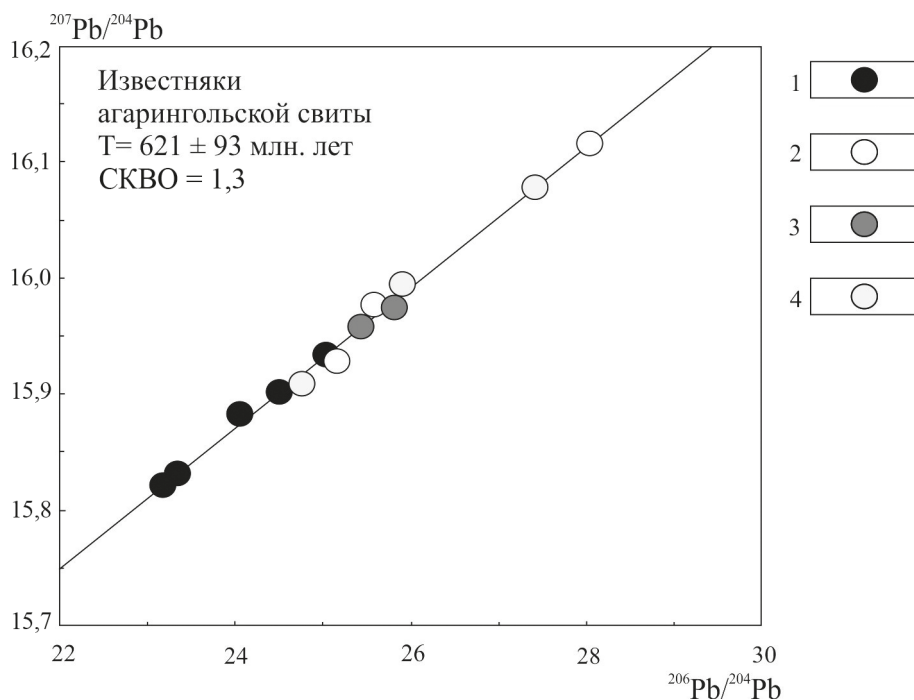


Рис. 6. График отношений $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для известняков агарингольской свиты и вычисленный возраст по 14 фигуративным точкам карбонатных фракций известняков: 1 — фракция ECC; 2 — фракция L1; 3 — фракция L2; 4 — фракция L3

раста по всем выделенным фракциям в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ равно 621 ± 93 млн лет, СКВО = 1,3 (рис. 6).

Обсуждение результатов и выводы

Петрографическое и геохимическое исследование карбонатных пород агарингольской свиты позволило выявить образцы наиболее пригодные для изучения U-Pb системы. Такие образцы слагают пачку углеродистых известняков в основании свиты. Выбранные образцы характеризуются мелкокристаллической структурой без видимых признаков вторичной перекристаллизации и отвечают геохимическим критериям сохранности карбонатов ($\text{Mn}/\text{Sr} < 0,05$, $\text{Fe}/\text{Sr} < 0,5$ и $\text{Mg}/\text{Ca} < 0,024$). Небольшие вариации изотопного состава $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ свидетельствуют о возможной неизменности образцов карбонатных пород, что позволило их использовать для Pb-Pb датирования. Для определения интенсивности постседиментационной перестройки U-Pb системы известняков и выделения фракций наиболее обогащенных первичным карбонатным материалом к нескольким образцам была применена методика ступенчатого растворения в 1N растворе соляной кислоты.

Вычисленное значение Pb-Pb возраста для известняков агарингольской свиты равно 621 ± 93 млн лет при СКВО=1,3. Большая погрешность определения возраста в данном случае напрямую связана с небольшой вариацией изотопного отношения

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в образцах от 23,193 до 28,064. При этом низкая величина СКВО показывает, что изученные образцы представляют собой когенетичную серию и поэтому могут определять возраст известняков. Известны примеры стратиграфически значимых возрастов для карбонатных пород, в которых вариации отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ были очень небольшими. Например, в наименее измененных кальцитах неопротерозойской формации Сете-Лагоас Бразилии (возраст 680 млн лет) при отношениях $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 19,413–28,136 погрешность составила 50 млн лет [5]. В карбонатах формации Пикелхауб (возраст 730 млн лет), залегающей на тиллитах Кайгас в Южной Африке, отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ варьировало от 20,661 до 27,302, а погрешность составляла 32 млн лет [10]. В раннепротерозойских доломитах туломозерской свиты Карелии (возраст 2090 млн лет) отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ было в пределах 17,127–23,340, при этом погрешность возраста составляла 70 млн лет [7]. В перечисленных случаях возраст позднее подтверждался дополнительными С- и Sr-изотопными хемотратиграфическими корреляциями [31, 32]. Другим примером могут служить известняки сорнинской свиты Кузнецкого Алатау, в которых были обнаружены спикеры кембрийских губок [33]. Широкие вариации отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в известняках этой свиты определили довольно низкую погрешность при вычислении возраста — 5 млн лет, а само значение — 523 млн лет — соответствовало раннему кембрию [8]. Погрешность определения Pb-Pb возраста известняков улунтуйской свиты байкальской серии Прибайкалья была достаточно высокой — 30 млн лет (возраст 560 млн лет) [12]. Однако полученный поздневендский возраст был подтвержден как Sr-хемотратиграфическими данными [12], так и U-Pb датировками обломочных цирконов из этой же свиты [34].

Низкие отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в осадочных карбонатных породах связаны с обогащением образцов первичным нерадиогенным свинцом или частичной потерей урана в ходе их геологической истории. Решить эту проблему и улучшить результаты исследования можно с помощью дополнительного отбора образцов. Тем не менее полученные в настоящей работе результаты Pb-Pb датирования карбонатных пород представляют важную информацию о возрасте агарингольской свиты ввиду отсутствия альтернативных геохронологических данных.

Полученный Pb-Pb возраст (621 ± 93 млн лет) совпадает с ранневендским возрастным интервалом, установленным на основе метода Sr-изотопной хемотратиграфии (рис. 7). Первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в наименее измененных образцах агарингольской свиты, удовлетворяющих геохимическим критериям сохранности Rb-Sr систем, лежит в пределах 0,70740–0,70748 (табл. 1) и отражает это отношение в Мировом океане в интервале 630–600 млн лет [30]. Близкое первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,70706–0,70732) и Pb-Pb возраст (620 ± 50 млн лет) имеют известняки и доломиты забитской свиты [35], слагающей основание боксонской серии в северо-восточной части Тувино-Монгольского массива. Названные отложения нижних горизонтов осадочного чехла Тувино-Монгольского массива могут быть коррелированы с карбонатными осадками цаганоломской свиты, перекрывающей позднерифейские вулканы дзобханской свиты в составе осадочного чехла Дзобханского микроконтинента. Pb-Pb возраст известняков в основании цаганоломской свиты равен 632 ± 14 млн лет, а первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в них варьирует в интервале 0,70676–0,70691 [9].

Таким образом, проведенное Pb-Pb датирование позволило получить первую прямую геохронологическую характеристику известняков агарингольской свиты

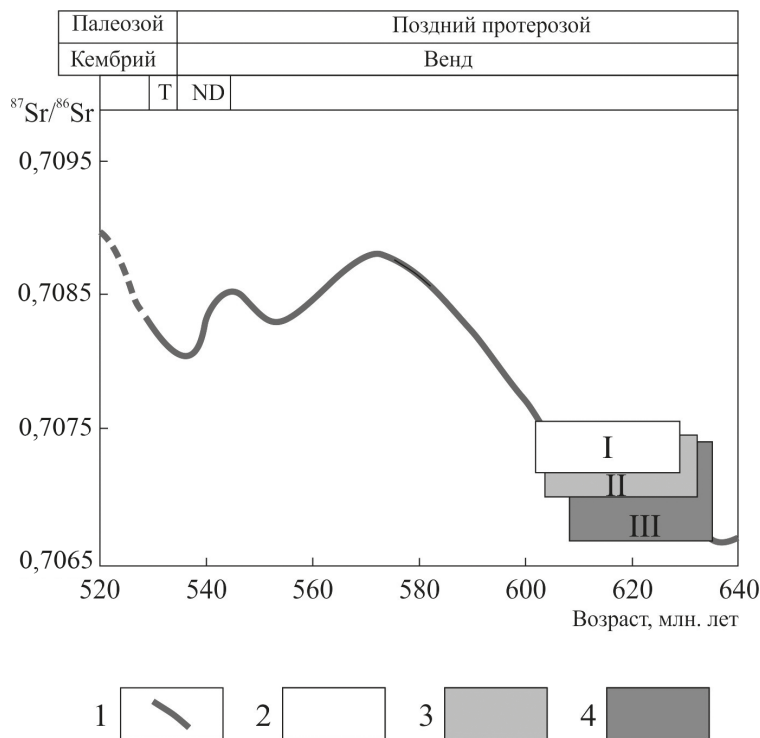


Рис. 7. Вариации отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в океане вендского периода и в томмотском веке раннего кембрия (по [30]). 1 — линия, отражающая вариации изотопного состава Sr в океане; 2–4 — отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в наименее измененных образцах карбонатных пород нижних горизонтов венд-кембрийского чехла Тувино-Могольского массива: I — агарингольская свита, II — забитская свита, III — цаганоломская свита. Сокращения ярусов: ND — немакит-далдынский, Т — томмотский

Северной Монголии. До этого, основываясь только на геологических данных, возраст карбонатных отложений агарингольской свиты определялся в широких пределах — от верхнего рифея до нижнего кембрия [25]. В настоящее время, опираясь на полученную Pb-Pb геохронологическую оценку и учитывая Sr-изотопную характеристику, следует ограничить временные рамки накопления карбонатного чехла в Мурэнской зоне Тувино-Монгольского массива ранним вендом (или ранним эдиакарием, согласно международной шкале).

Авторы благодарны А. К. Худолею за важные замечания, которые улучшили рукопись.

Литература

1. Сергеев С. А., Пушкарёв Ю. Д., Лохов К. И., Сергеев Д. С. Обзор современных методов изотопной геохронологии (составная часть Геохронологического Атласа). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. 31 с.
2. Rooney A. D., Macdonald F. A., Strauss J. V., Dudás F. Ö., Hallmann C., Selby D. Re-Os geochronology and coupled Os-Sr isotope constraints on the Sturtian snowball Earth // Proc. National Academy of Sciences, USA. 2014. Vol. 111. P. 51–56.

3. Jahn B.-M., Cuvellier H. Pb-Pb and U-Pb geochronology of carbonate rocks: an assessment // *Chem. Geol.* 1994. Vol. 115, N 1/2. P. 125–151.
4. Babinski M., Chemale F., Jr., Van Schmus W.R. The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilatero Ferrifero, Brazil // *Precambrian Res.* 1995. Vol. 72, N 3/4. P. 235–245.
5. Babinski M., Vieira L.C., Trindade R. I. F. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambui Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events // *Terra Nova.* 2007. Vol. 19, N 6. P. 401–406.
6. Овчинникова Г.В., Васильева И.М., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Горохов И.М. U-Pb систематика карбонатных пород протерозоя: инзерская свита стратотипа верхнего рифея (Южный Урал) // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* 1998. Т. 6, № 4. С. 20–31.
7. Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Мележик В.А., Горохов И.М., Васильева И.М., Гороховский Б.М. Pb-Pb возраст ятулийских карбонатных пород: Туломозерская свита Юго-Восточной Карелии // *Стратиграфия. Геологическая корреляция.* 2007. Т. 15, № 4. С. 20–33.
8. Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Горохов И.М., Летникова Е.Ф., Каурова О.К. Pb-Pb возраст и Sr-хемостратиграфия известняков сорнинской свиты, хребет Азыр-Тал Кузнецкого Алатау // *ДАН.* 2011. Т. 437, № 2. С. 220–223.
9. Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Горохов И.М., Летникова Е.Ф. U-Pb возраст и Sr-изотопная характеристика надтилитовых известняков неопротерозойской цаганоломской свиты, бассейн р. Дзабхан, Западная Монголия // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* 2012. Т. 20, № 6. С. 28–40.
10. Folling P. G., Zartman R. E., Frimmel H. E. A novel approach to double-spike Pb–Pb dating of carbonate rocks: examples from Neoproterozoic sequences in southern Africa // *Chemical Geology.* 2000. Vol. 171. P. 97–122.
11. Каурова О.К., Овчинникова Г.В., Горохов И.М. U-Th-Pb систематика докембрийских карбонатных пород: определение возраста формирования и преобразования карбонатных осадков // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* 2010. Т. 18, № 3. С. 27–44.
12. Kuznetsov A. B., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M., Kaurova O. K., Konstantinova G. V., Letnikova E. F. Age constraints on the Neoproterozoic Baikal group from combined Sr isotopes and Pb-Pb dating of carbonates from the Baikal type section, Southeastern // *Journal of Asian Earth Sciences.* 2013. Vol. 62. P. 51–66.
13. Шуколюков Ю. А., Горохов И. М., Левченков О. А. Графические методы изотопной геологии. М.: Недра, 1974. 207 с.
14. Кузнецов А.Б., Крупенин М.Т., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Маслов А.В. Формирование и преобразование карбонатных пород и сидеритовых руд бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал): Sr-изотопная характеристика и Pb-Pb возраст // *Литология и полезн. ископаемые.* 2005. № 3. С. 227–249.
15. Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Семихатов М.А., Горохов И.М., Каурова О.К. Sr-изотопная характеристика и Pb-Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* 2008. Т. 16, № 2. С. 16–34.
16. Геология Монгольской Народной Республики. М.: Недра. 1973. Т. 2. 752 с.
17. Кузьмичев А.Б. Раннебайкальские тектонические события в Тувино-Монгольском массиве: коллизия островной дуги и континента // *Геотектоника.* 2001. № 3. С. 44–59.
18. Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: ПРОБЕЛ-2000, 2004. 192 с.
19. Беличенко В.Г., Резницкий Л.З., Гелетий Н.К., Бараиш И.Г. Тувино-Монгольский массив (к проблеме микроконтинентов Палеоазиатского океана) // *Геология и геофизика.* 2003. № 6. С. 554–565.
20. Хераскова Т.Н., Самыгин С.Г. Тектонические условия формирования венд-среднекембрийского терригенно-карбонатного комплекса Восточного Саяна // *Геотектоника.* 1992. № 6. С. 18–36.
21. Ильин А.В. О Тувино-Монгольском массиве // *Материалы по региональной геологии Африки и зарубежной Азии.* М., 1971. С. 67–71. (Тр. НИИЗарубежгеология; вып. 22.)
22. Ильин А.В. Геологическое развитие Южной Сибири и Монголии в позднем докембрии-кембрии. М.: Наука. 1982. 114 с.
23. Беличенко В.Г., Боос Р.Г. Боксон-Хубсугул-Дзабханский палеомикроконтинент в структуре Центрально-Азиатских палеозонид // *Геология и геофизика.* 1988. № 12. С. 20–27.
24. Беличенко В.Г., Скляров Е.В., Добрецов Н.Л., Томуртоого О. Геодинамическая карта Палеоазиатского океана. Восточный сегмент // *Геология и геофизика.* 1994. № 7–8. С. 29–40.
25. Гибшер А.С., Бат-Ирээдуй Я. Стратиграфия позднего докембрия — раннего кембрия Мурэнской зоны Западного Прихубсугуля (МНР) // *Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири.* Новосибирск: ИГТ СО АН СССР, 1990. С. 91–104.

26. Кузьмичев А. Б., Журавлев Д. З. О довендском возрасте окинской серии (Восточный Саян) по результатам датирования силлов Sm-Nd методом // ДАН. 1999. Т. 364, № 6. С. 796–800.
27. Форт. Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир. 1989. 590 с.
28. Rosman K. J. R., Taylor P. D. P. Isotopic compositions of the elements 1997 // Pure and Appl. Chem. 1998. Vol. 70, N 1. P. 217–235.
29. Шуколюков Ю. А. Продукты деления тяжелых элементов на Земле. М.: Энергоиздат. 1982. 126 с.
30. Кузнецов А. Б., Семихатов М. А., Горохов И. М. Возможности стронциевой изотопной хемотрастиграфии в решении проблем стратиграфии верхнего протерозоя (рифей и венда) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2014. Т. 22, № 6. С. 3–25.
31. Kuznetsov A. B., Melezhik V. A., Gorokhov I. M., Melnikov N. N., Konstantinova G. V., Kutayavin E. P., Turchenko T. L. Sr isotopic composition of Paleoproterozoic ¹³C-rich carbonate rocks: the Tulomozero Formation, SE Fennoscandian Shield // Precambrian Research. 2010. Vol. 182, N 4. P. 300–312.
32. Frimmel H. E. The Kaigas and Numees formations, Port Nolloth Group, in South Africa and Namibia // Geological Society, London, Memoirs. 2011. Vol. 36. P. 223–231.
33. Постников А. А., Терлеев А. А. Стратиграфия неопротерозоя Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 3. С. 295–309.
34. Гладкочуб Д. П., Станевич А. М., Мазукабзов А. М., Донская Т. В., Писаревский С. А., Николь Г., Мотова З. Л., Корнилова Т. А. Ранние этапы развития Палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 10. С. 1472–1490.
35. Смирнова З. Б., Кузнецов А. Б. Pb-Pb возраст карбонатных пород забитской свиты, боксонская серия Восточного Саяна // Материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии «Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы». СПб.: ИГГД РАН, 2015. С. 277–279.

Для цитирования: Ситкина Д. Р., Кузнецов А. Б., Смирнова З. Б. Возраст карбонатных пород агарингольской свиты (Северная Монголия): возможности Pb-Pb датирования // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62. Вып. 2. С. 192–208. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.205

References

1. Sergeev S. A., Pushkarev Y. D., Lokhov K. I., Sergeev D. S. *Obzor sovremennykh metodov izotopnoy geokhronologii (sostavnaya chast' Geokhronologicheskogo Atlasa) [Review of modern methods of isotope geochronology (part of the Geochronological Atlas)]*. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2015, 31 p. (In Russian)
2. Rooney A. D., Macdonald F. A., Strauss J. V., Dudás F. Ö., Hallmann C., Selby D. Re-Os geochronology and coupled Os-Sr isotope constraints on the Sturtian snowball Earth. *Proc. National Academy of Sciences, USA*, 2014, vol. 111, pp. 51–56.
3. Jahn B.-M., Cuvellier H. Pb-Pb and U-Pb geochronology of carbonate rocks: an assessment. *Chem. Geol.*, 1994, vol. 115, no. 1/2, pp. 125–151.
4. Babinski M., Chemale F., Jr., Van Schmus W. R. The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilatero Ferrifero, Brazil. *Precambrian Res.*, 1995, vol. 72, no. 3/4, pp. 235–245.
5. Babinski M., Vieira L. C., Trindade R. I. F. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambui Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova*, 2007, vol. 19, no. 6, pp. 401–406.
6. Ovchinnikova G. V., Vasil'eva I. M., Kuznetsov A. B., Gorokhov I. M., Gorokhovskii B. M., Levskii L. K., Semikhatov M. A. U-Pb systematics of Proterozoic carbonate rocks: The Inzer formation of the Upper Riphean stratotype (Southern Urals). *Stratigraphy and Geological Correlation*, 1998, vol. 6, no. 4, pp. 336–347.
7. Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Gorokhov I. M., Vasil'eva I. M., Gorokhovskii B. M., Melezhik V. A. Pb-Pb age of Jatulian carbonate rocks: The Tulomozero Formation of southeast Karelia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2007, vol. 15, no. 4, pp. 359–372.
8. Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Gorokhov I. M., Letnikova E. F., Kaurova O. K. U-Pb age and Sr-chemostratigraphy of limestone from the Sorna Formation, Azyr-Tal Range, Kuznetsk Alatau. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 437, no. 2, pp. 331–334.
9. Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Vasil'yeva I. M., Gorokhov I. M., Letnikova E. F. U-Pb age and Sr isotope signature of cap limestones from the Neoproterozoic Tsagaan Oloom Formation, Dzabkhan River Basin, Western Mongolia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2012, vol. 20, no. 6, pp. 516–527.

10. Folling P.G., Zartman R.E., Frimmel H.E. A novel approach to double-spike Pb–Pb dating of carbonate rocks: examples from Neoproterozoic sequences in southern Africa. *Chemical Geology*, 2000, vol. 171, pp. 97–122.
11. Kaurova O. K., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M. U-Th-Pb systematics of Precambrian carbonate rocks: dating of the formation and transformation of carbonate sediments. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 252–268.
12. Kuznetsov A. B., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M., Kaurova O. K., Konstantinova G. V., Letnikova E. F. Age constraints on the Neoproterozoic Baikal group from combined Sr isotopes and Pb-Pb dating of carbonates from the Baikal type section, Southeastern. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, vol. 62, pp. 51–66.
13. Shukolyukov Y. A., Gorokhov I. M., Levchenkov O. A. *Graficheskiye metody izotopnoy geologii* [Graphical methods of isotope geology]. Moscow, Nedra Publ., 1974, 207 p. (In Russian)
14. Kuznetsov A. B., Ovchinnikova G. V., Krupenin M. T., Gorokhov I. M., Maslov A. V. Kaurova O. K., Ellmies R. Diagenesis of carbonate and siderite deposits of the Lower Riphean Bakal Formation, the Southern Urals: Sr isotopic characteristics and Pb-Pb age. *Lithology and Mineral Resources*, 2005, vol. 40, no. 3, pp. 195–215.
15. Kuznetsov A. B., Ovchinnikova G. V., Semikhatov M. A., Gorokhov I. M., Kaurova O. K., Krupenin M. T., Maslov A. V. The Sr isotopic characteristics and Pb-Pb age of carbonate rocks from the Satka Formation, Lower Riphean Burzyan group of the Southern Urals. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2008, vol. 16, no. 2, pp. 120–137.
16. *Geologiya Mongol'skoy Narodnoy Respubliki* [Geology of the Mongolian Republic]. Moscow, Nedra Publ., 1973, vol. 2, 752 p. (In Russian)
17. Kuz'michev A. B. Rannebaykal'skiye tektonicheskiye sobytiya v Tuvino-Mongol'skom massive: kolliziya ostrovnogo dugi i kontinenta [Early Baikalian tectonic events in the Tuva-Mongolian massif: collision of an island arc and microcontinent]. *Geotektonika* [Geotectonics], 2001, no. 3, pp. 44–59. (In Russian)
18. Kuz'michev A. B. *Tektonicheskaya istoriya Tuvino-Mongol'skogo massiva: rannebaykal'skiy, pozdnebaykal'skiy i rannekaledonskiy etapy* [Tectonic history of Tuva-Mongolia Massif: Early Baikalian, Late Baikalian and Early Caledonian stages]. Moscow, PROBEL-2000 Publ., 2004, 192 p. (In Russian)
19. Belichenko V. G., Reznitskiy L. Z., Geletiy N. K., Barash I. G. Tuvino-Mongol'skiy massiv (k probleme mikrokontinentov Paleooziatskogo okeana) [Tuva-Mongolia terrane (in the context of microcontinents in the Paleasian ocean)]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2003, no. 6, pp. 554–565. (In Russian)
20. Kheraskova T. N., Samygin S. G. Tektonicheskiye usloviya formirovaniya vend-sredne-kembriyskogo terrigenno-karbonatnogo kompleksa Vostochnogo Sayana [Tectonic conditions of formation Vend-mid-Cambrian clastic-carbonate complex of the Eastern Sayan]. *Geotektonika* [Geotectonics], 1992, no. 6, pp. 18–36. (In Russian)
21. Il'in A. V. O Tuvino-Mongol'skom massive [About Tuva-Mongolian massif]. *Materialy po regional'noy geologii Afriki i zarubezhnoy Azii* (Tr. NIIZarubezhgeologiya. Vyp. 22) [Proceedings of Research Institute «Zarubezhgeologia». Issue 22], Moscow, 1971, pp. 67–71. (In Russian)
22. Il'in A. V. *Geologicheskoye razvitiye Yuzhnoy Sibiri i Mongolii v pozdnem dokembrii-kembrii* [Geological Development of South Siberia and Mongolia in the Late Precambrian-Cambrian]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 114 p. (In Russian)
23. Belichenko V. G., Boos R. G. Bokson-Khubsugul-Dzabkhanskiy paleomikrokontinent v strukture Tsentral'no-Aziatskikh paleozoid [Bokson-Khubsugul-Dzabkhan paleomicrocontinent in the structure of the Central Asian Paleozoids]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1988, no. 12, pp. 20–27. (In Russian)
24. Belichenko V. G., Sklyarov E. V., Dobretsov N. L., Tomurtogoo O. Geodinamicheskaya karta Paleooziatskogo okeana. Vostochnyy segment [Geodynamic map of the Paleo-Asian Ocean. East segment]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1994, no. 7–8, pp. 29–40. (In Russian)
25. Gibsher A. S., Bat-Ireeduy J. Stratigrafiya pozdnego dokembriya — rannego kembriya Murenskoy zony Zapadnogo Prikhubsugul'ya (MNR) [Stratigraphy of the Late Precambrian — Early Cambrian Murenskaya Zone West Hovsgol (Mongolia)]. *Pozdnyy dokembriy i ranniy paleozoy Sibiri* [Late Precambrian and Early Paleozoic of Siberia]. Novosibirsk: IGG SD AS USSR, 1990, pp. 91–104. (In Russian)
26. Kuz'michev A. B., Zhuravlev D. Z. O dovendskom vozraste okinskoy serii (Vostochnyy Sayan) po rezul'tatam datirovaniya sillov Sm-Nd metodom [Pre-Vendian age of the Oka group, Eastern Sayan: evidence from Sm-Nd dating of sills]. *DAN* [Doklady Earth Sciences], 1999, vol. 364, no. 6, pp. 796–800. (In Russian)
27. Faure G. *Principles of isotope geology*. Wiley, 1986, 598 p. [Russ. ed.: For. G. Osnovy izotopnoy geologii. Moscow, Mir Publ., 1989, 590 p.]

28. Rosman K. J. R., Taylor P. D. P. Isotopic compositions of the elements 1997. *Pure and Appl. Chem*, 1998, vol. 70, no. 1, pp. 217–235.
29. Shukolyukov Y. A. *Produkty deleniya tyazhelykh elementov na Zemle [Products of fission of heavy elements on Earth]*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 126 p. (In Russian)
30. Kuznetsov A. B., Semikhatov M. A., Gorokhov I. M. The Sr isotope chemostratigraphy as a tool for solving stratigraphic problems of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian). *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2014, vol. 22, no. 6, pp. 553–575.
31. Kuznetsov A. B., Melezhik V. A., Gorokhov I. M., Melnikov N. N., Konstantinova G. V., Kutyavin E. P., Turchenko T. L. Sr isotopic composition of Paleoproterozoic ¹³C-rich carbonate rocks: the Tulomozero Formation, SE Fennoscandian Shield. *Precambrian Research*, 2010, vol. 182, no. 4, pp. 300–312.
32. Frimmel H. E. The Kaigas and Numees formations, Port Nolloth Group, in South Africa and Namibia. *Geological Society, London, Memoirs*, 2011, vol. 36, pp. 223–231.
33. Postnikov A. A., Terleev A. A. Neoproterozoic stratigraphy of the Altai-Sayan folded area. *Russian Geology and Geophysics*, 2004, vol. 45, no. 3, pp. 269–283.
34. Gladkochub D. P., Stanevich A. M., Mazukabzov A. M., Donskaya T. V., Motova Z. L., Kornilova T. A., Pisarevsky S. A., Nicoll G. Early evolution of the Paleoasian ocean: LA-ICP-MS dating of detrital zircon from Late Precambrian sequences of the southern margin of the Siberian craton. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 10, pp. 1150–1163.
35. Smirnova Z. B., Kuznetsov A. B. Pb-Pb возраст карбонатных пород забитской свиты, боксонская серия Восточного Саяна [Pb-Pb age of carbonate rocks of the Zabit suite, the Bokson series of the Eastern Sayan]. *Materialy VI Rossiyskoy konferentsii po izotopnoy geokhronologii "Izotopnoye datirovaniye geologicheskikh protsessov: novyye rezul'taty, podkhody i perspektivy" [Proceedings of the VI Russian Conference on Isotope Geochronology "Isotope dating of geological processes, new results, approaches and perspectives"]*, St. Petersburg, IPGG RAS, 2015, pp. 277–279. (In Russian)

For citation: Sitkina D. R., Kuznetsov A. B., Smirnova Z. B. Age of carbonate rocks of the agaringol formation (Northern Mongolia): possibilities of Pb-Pb dating. *Vestnik SPbSU. Earth Sciences*, 2017, vol. 62, issue 2, pp. 192–208. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.205

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2016 г.

Статья рекомендована в печать 1 марта 2017 г.

Контактная информация

Ситкина Дарья Романовна — студент; dariasitkina@gmail.com

Кузнецов Антон Борисович — член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией; antonbor9@mail.ru

Смирнова Зинаида Борисовна — младший научный сотрудник; zbsmirnova@gmail.com

Sitkina Dar'ya R. — student; dariasitkina@gmail.com

Kuznetsov Anton B. — Corresponding Member of RAS, Head of Laboratory; antonbor9@mail.ru

Smirnova Zinaida B. — Junior Researcher; zbsmirnova@gmail.com